

EROSÃO HÍDRICA E TRANSPORTE SÓLIDO EM PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

Maria Teresa PONCE ÁLVARES ¹; Maria Teresa PIMENTA ¹

RESUMO

A erosão hídrica, transporte sólido e sedimentação são processos naturais, complexos e interdependentes. Tais processos são cada vez mais afectados por impactos antropogénicos, conduzindo frequentemente à necessidade de efectuar intervenções de manutenção nos sistemas hidráulicos fluviais.

O Instituto da Água, dadas as suas competências institucionais nesses domínios e de acordo com a necessidade de caracterização destes processos em determinadas zonas de Portugal Continental, tem vindo a desenvolver alguns trabalhos nestas áreas isoladamente. Tem sido sempre objectivo desses estudos sobre erosão, transporte sólido e sedimentação, caracterizar de forma integrada os processos envolvidos, permitindo assim estabelecer termos de comparação e calibração.

Neste contexto e pretendendo de algum modo relacionar e calibrar as metodologias de cálculo utilizadas na avaliação da erosão hídrica e transporte sólido, seleccionaram-se três bacias hidrográficas de estações hidrométricas do sul do país, com dados de caudal sólido. Para o cálculo da erosão hídrica nas bacias hidrográficas afluentes a estas secções aplicou-se a equação universal de perda dos solos de Wischmeier, enquanto a determinação dos caudais sólidos transportados se apoiou no cálculo das curvas características de caudal sólido estabelecidas para cada uma das secções. A partir dos resultados obtidos é possível aferir as metodologias utilizadas.

Palavras-Chave: Erosão hídrica, transporte sólido, sedimentação, Sistemas de Informação Geográfica

¹ Instituto da Água - Direcção de Serviços de Recursos Hídricos
Av. Almirante Gago Coutinho, 30
1000 LISBOA

1. INTRODUÇÃO

A erosão hídrica, transporte sólido e sedimentação são processos naturais, complexos e interdependentes. Tais processos são cada vez mais afectados por impactos antropogénicos, os quais alteram seriamente as propriedades do solo e podem representar perdas económicas consideráveis, conduzindo frequentemente à necessidade de efectuar intervenções de manutenção nos sistemas hidráulicos fluviais. A conservação do solo deve ser considerada de forma a encontrar o máximo nível de produção abaixo do valor de perda de solo que, teoricamente, permita a sua regeneração natural. A redução dos níveis de erosão para um valor aceitável pode ter antecedentes diferentes como o controle da perda de nutrientes em terrenos agrícolas ou a prevenção da poluição das águas e diminuição da sedimentação em albufeiras, rios e canais.

Nos sistemas fluviais, as partículas de solo são erodidas por efeito de diferentes processos, sendo depois transportadas, até se depositarem em locais onde a energia do escoamento disponível para o transporte é insuficiente. A perda de solo, por erosão hídrica, está intimamente ligada à precipitação pela capacidade de destacamento das gotas de chuva e pela sua contribuição para o escoamento sobre o terreno.

A erosão hídrica dos solos e a consequente produção de sedimentos tem sido objecto de preocupação crescente da gestão do uso do solo e da água. Esta preocupação é mais sentida em espaços geográficos onde predominam as condições climáticas caracterizadas por temperaturas e precipitações de apreciável variabilidade, como é o caso do clima mediterrâneo agravando-se nos casos em que o solo é escasso e pouco profundo.

O INAG tem vindo a desenvolver diversas metodologias de cálculo de erosão hídrica, transporte sólido e sedimentação em albufeiras de modo a tornar os procedimentos de cálculo eficientes e de simples generalização a qualquer área do território português, de acordo com a cartografia e informação disponível.

O presente trabalho tem como objectivo principal a comparação da produção de sedimentos, obtida a partir de uma metodologia de cálculo de erosão hídrica e do transporte sólido medido numa estação sedimentológica, em várias bacias hidrográficas, como se descreve na Figura 1, permitindo deste modo relacionar os dois fenómenos de uma forma integrada.

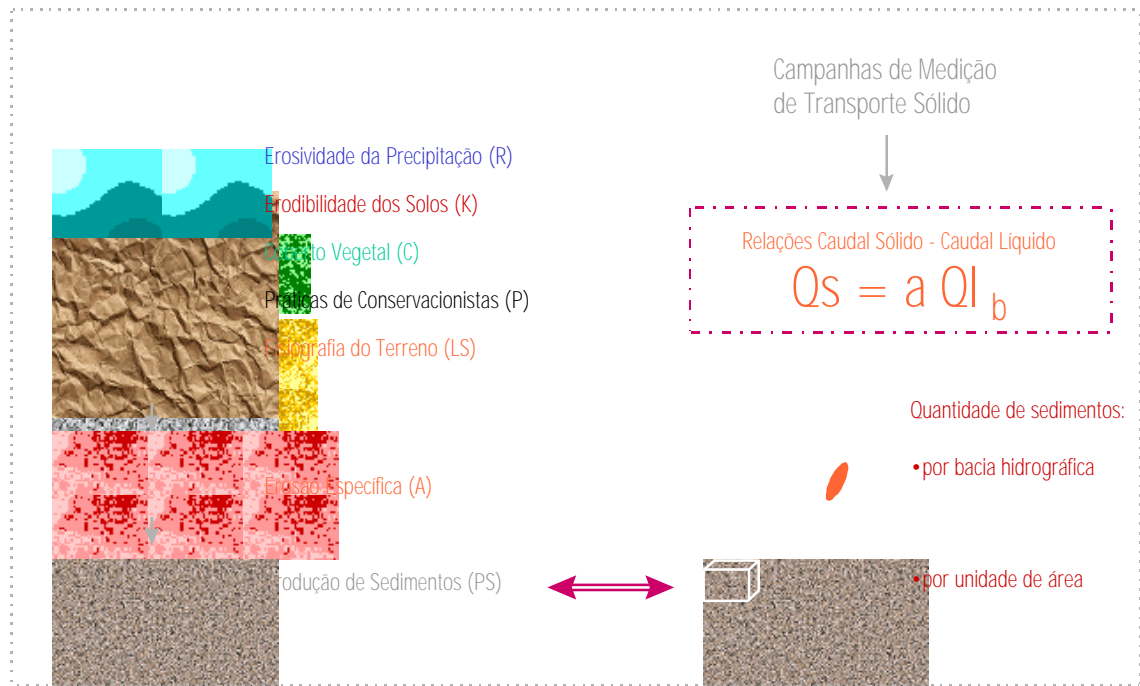


Figura 1 - Relação entre as metodologias de cálculo da erosão hídrica e sedimentação em bacias hidrográficas

2. EROSÃO HÍDRICA

A erosão do solo caracteriza-se pela remoção de material superficial, conduzindo ao empobrecimento do solo e em situações extremas à desertificação. O processo de erosão resulta de uma combinação de factores que são dependentes e estão interligados entre si, e apresentam grande variabilidade espacial e temporal, tornando este fenómeno difícil de equacionar e quantificar. Os factores que influenciam os processos erosivos são a erosividade da precipitação, medida pela sua intensidade e energia cinética, a erodibilidade dos solos, definida pelas suas características físicas e químicas, o coberto vegetal, pela sua maior ou menor protecção do solo, os declives e comprimentos das encostas e as práticas de conservação existentes.

A modelação da erosão hídrica tem sido habitualmente avaliada a partir de modelos empíricos, nomeadamente a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) de Wischmeier. A EUPS agrupa as variáveis que influenciam a erosão em seis factores genéricos, que se relacionam da seguinte forma:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

em que **A** traduz a perda de solo média ou erosão específica, **R** o factor de erosividade da precipitação, **K** o factor de erodibilidade do solo, **LS** o factor fisiográfico, que compreende o

comprimento da encosta - L, e o declive - S, **C** o factor relativo ao coberto vegetal e **P** o factor de prática agrícola ou de medidas de controlo de erosão.

É de considerar, posteriormente ao zonamento da erosão, a calibração do modelo utilizado com dados de volumes de sedimentos que passam na secção que define a bacia hidrográfica considerada.

2.1. Cálculo da Erosão Hídrica

A selecção das bacias de estudo pressupõe a existência de estações de medição de transporte sólido sendo aconselhável a escolha daquelas que possuem maior número de dados fiáveis, em zonas da bacia hidrográfica do Guadiana em que tenha havido algum reconhecimento de campo.

A aplicação do modelo de erosão de Wischmeier é efectuada com utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) sendo possível obter como resultado a erosão hídrica para cada unidade cartográfica da bacia em estudo com uma discretização de 25 metros no terreno, como descrito em PIMENTA, 1995. Cada factor da EUPS consiste numa carta temática do seguinte modo: a erosividade da precipitação (R) resulta de uma carta de isoerodentes obtida em COUTINHO et al, 1993, a erodibilidade dos solos (K) resulta da actualização da informação das cartas complementares de solos à escala 1:25000, bem como o factor de coberto vegetal (C) das cartas de uso do solo, também à mesma escala. O factor de declive (S) e de comprimento das encostas (L) é obtido a partir das cartas de altimetria das bacias hidrográficas resultando de operações de análise espacial realizadas em SIG sobre o Modelo Digital do Terreno. As práticas de conservação do solo (factor P) são praticamente inexistentes sendo, deste modo atribuído o valor relativo à unidade para toda a bacia hidrográfica de estudo.

Toda esta informação é sobreposta, obtendo uma carta de erosão específica distribuída espacialmente e em termos médios para a bacia.

Uma vez que a EUPS não prevê a deposição das partículas do solo, é necessário determinar a produção de sedimentos, tornando possível a sua comparação com os valores medidos em estações da rede sedimentológica. Para obter a produção de sedimentos de encostas complexas ou de bacias hidrográficas pode-se recorrer a uma metodologia que consiste na aplicação de um coeficiente de produção de sedimentos à erosão específica calculada anteriormente. Este coeficiente é estimado a partir da área da bacia, do quociente entre o comprimento da bacia e a respectiva altura e da razão de bifurcação, segundo uma das equações derivadas por ROEHL 1962, citado em TOMÁS, 1992.

$$\log_{10} (\text{CPS}) = 1,913 - 0,339. \log_{10} (3,861.A_b) \quad (2)$$

$$\log_{10} (\text{CPS}) = 4,501 - 0,230. \log_{10} (3,861.A_b) - 0,501. \log_{10} (L_b/H_b) - 2,786. \log_{10} (R_b) \quad (3)$$

sendo, CPS o coeficiente de produção de sedimentos, em percentagem; Ab a área da bacia, em km²; Lb/Hb o quociente entre o comprimento da bacia e a respectiva altura; e Rb a razão de bifurcação.

A produção de sedimentos de uma bacia hidrográfica é assim obtida pela equação:

$$PS = CPS \cdot A \quad (4)$$

sendo PS a produção de sedimentos e A a erosão específica calculada pela EUPS em que PS e A são expressos nas mesmas unidades.

Este valor de produção de sedimentos assim obtido é então comparado com os valores de transporte sólido obtidos segundo a metodologia que se descreve seguidamente.

3. TRANSPORTE SÓLIDO

Os sedimentos transportados numa linha de água, provêm essencialmente da erosão laminar nas encostas da bacia hidrográfica e da erosão localizada dos próprios canais de escoamento. As características do escoamento e do canal, são, juntamente com as características dos sedimentos os principais factores que determinam o transporte sólido num rio.

Genericamente, o transporte sólido pode ocorrer de duas formas:

- transporte sólido por arrastamento, em que os sedimentos se movem junto ao fundo e
- transporte sólido em suspensão, em que os sedimentos se deslocam no seio da água, a uma certa distância do fundo.

Vulgarmente, para determinação do caudal sólido que passa numa secção de um rio, são utilizadas as seguintes vias:

- obtenção de relações teóricas envolvendo sempre, em maior ou menor grau, a simplificação do fenómeno;
- experimentação laboratorial que conduza ao relacionamento das observações do caudal sólido com as características hidráulicas do escoamento;
- medições de campo visando, também, a obtenção de relações empíricas entre caudal sólido e as características hidráulicas do escoamento.

Esta última é a que tem conduzido a resultados mais realistas, para os cursos de água em que se processam as medições. O objectivo de um programa de recolha de amostras num rio, é portanto, conseguir um número suficiente de dados de transporte sólido por arrastamento e em suspensão, de modo a definir o volume total de sedimentos transportados e identificar as correlações existentes entre os caudais líquido e sólido em diferentes circunstâncias.

As dificuldades encontradas na obtenção de amostras e o elevado custo associado às medições, constituem talvez uma das principais razões pelas quais esta via tem sido pouco explorada.

3.1. Transporte sólido em suspensão

A estimativa do caudal sólido em suspensão numa dada secção do rio é simples e necessita somente de dados de caudal líquido e de concentração do material em suspensão. O programa de amostragem varia de rio para rio, dependendo das características hidráulicas do sistema e a frequência das recolhas pode ser variada, mas deve incluir sempre amostras de períodos de cheia e deve representar bem a amplitude dos dados de caudal desse rio. Pode-se assim estabelecer uma relação entre o caudal líquido (Q) e o caudal sólido em suspensão (Q_{ss}), vulgarmente denominada por “Curva de Caudal Sólido em Suspensão”, traduzindo-se da seguinte forma:

$$Q_{ss} = a Q^b \quad (5)$$

O caudal sólido em suspensão obtido por amostragem, constitui somente uma parte do caudal sólido total transportado no rio. O material transportado junto ao fundo, não fica assim contabilizado. O estabelecimento de um programa de avaliação de transporte sólido num rio, deve contemplar um estudo preliminar, que permita avaliar a relação entre o transporte em suspensão e por arrastamento, considerando para tal, um conjunto de características do material transportado, conforme se apresenta no quadro 3.1 (STRAND e PEMBERTON, 1982).

Como se pode ver, para as condições 1 e 2 (em que o material de fundo é predominantemente grosseiro) podem resultar cargas significativas de material transportado junto ao fundo, o que requer um programa de amostragem específico.

3.2. Transporte sólido por arrastamento

Existem numerosas metodologias para cálculo do transporte sólido por arrastamento, sendo uma das mais conhecidas, a de EINSTEIN (1950), mas outras fórmulas são também muito utilizadas, como as de MEYER-PETER e MÜLLER (1948), ACKERS e WHITE (1973), YANG (1973) e as mais recentes de KARIM e KENNEDY (1981 e 1990) e VAN RIJN (1984), citados em SIMONS e SENTURK (1977), CARDOSO, A.H. (1984), NEVES, (1992), CARDOSO, NEVES e OLIVEIRA (1994).

Quadro3.1

Relação transporte sólido em suspensão e por arrastamento
(STRAND e PEMBERTON, 1982)

Condição	Conc. de sedimentos suspensão	Material de fundo predominante	Textura do material em suspensão	Relação entre mat. de fundo e suspensão
1	< 1000	areia	20 a 50 % areia	25 a 150
2	1000 a 7500	areia	20 a 50 % areia	10 a 35
3	> 7500	areia	20 a 50 % areia	5
4	qualquer conc.	argila compactada, gravilha,	< 25 % areia seixos e pedras	5 a 15
5	qualquer conc.	limo e argila	sem areia	< 2

Devido às grandes incertezas que a determinação do transporte de sedimentos num curso de água pode incluir, algumas recomendações devem ser consideradas quanto se procede à análise de dados de campo. Neste contexto, SHEN (1971 citado em SIMONS E SENTÜRK, 1977) considera que quando existem medições de caudal sólido em suspensão é mais adequado:

- 1) utilizar a equação modificada de EINSTEIN (1955) para calcular a carga de sedimentos transportados junto ao fundo, com base nos dados existentes;
- 2) analisar separadamente material transportado junto ao fundo e em suspensão;
- 3) analisar quais as equações de cálculo de transporte sólido que melhor se ajustam aos dados existentes e utilizá-las para estimar cargas de sedimentos transportados nos dias em não existam medições.

CARDOSO, NEVES e OLIVEIRA em 1984, testaram as fórmulas que mais têm sido utilizadas no nosso País, para um conjunto de dados dos rios Tejo e Mondego e concluíram que as equações de KARIM e KENNEDY são as que conduzem a melhores resultados, para as condições analisadas.

Para este trabalho utilizaram-se dados de medições de transporte sólido efectuadas em estações da bacia hidrográfica do rio Guadiana durante as décadas de 80 e 90. Nestas estações existem somente dados de concentração de sedimentos em suspensão e granulometria do material de fundo, pelo que foi necessário estimar o volume total de sedimentos transportados com a aplicação de uma metodologia de cálculo de transporte de sedimentos por arrastamento.

Numa fase inicial deste trabalho utilizou-se a metodologia modificada de Einstein para cálculo do transporte sólido por arrastamento, adaptada aos dados existentes, mas os resultados obtidos pareceram um tanto sobrevalorizados, pelo que se considerou mais correcto utilizar outras fórmulas de cálculo para comparação de resultados. Neste sentido para o cálculo do transporte sólido total utiliza-se a metodologia de KARIM e KENNEDY (1990) e para o transporte sólido por arrastamento a equação de MEYER-PETER e MÜLLER.

4. TRABALHOS A DESENVOLVER

Pretende-se num futuro próximo aplicar as metodologias expostas de uma forma sistemática às outras bacias hidrográficas definidas por estações sedimentológicas, procurando por um lado verificar a aplicabilidade das diferentes metodologias de cálculo de transporte sólido e por outro estabelecer coeficientes de transformação para aplicação da EUPS ao nosso País e definir uma regionalização dos processos envolvidos.

As capacidades de processamento informático das actuais tecnologias, aliado ao facto de existirem diversos modelos de cálculo de erosão hídrica e transporte de sedimentos, integrados em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), permitem a sua avaliação de modo espacialmente distribuído com maior eficiência e rapidez. A utilização de tais modelos como o AGNPS (Agricultural Nonpoint Source) e o ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environmental Response Simulation) entre outros, são muitas vezes condicionados pela elevado número de dados de entrada necessários por cada modelo. Nos casos em que seja possível obter a informação de base necessária proceder-se-à à sua aplicação.

A determinação de volumes depositados com utilização das ferramentas de análise próprias dos SIG, a partir de levantamentos batimétricos efectuados em albufeiras, permitirá obter uma outra frente de informação para comparação e calibração dos resultados.

BIBLIOGRAFIA

ÁLVARES, M.T. - *Sedimentação em albufeiras na bacia hidrográfica do rio Guadiana*, Dissertação de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos, Lisboa, Instituto Superior Técnico (IST), 1996.

CARDOSO, A. H.; - *Transporte Sólido por Arrastamento em Escoamentos com Superfície Livre*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, 1984.

CARDOSO, A. H.; NEVES, G. O.; OLIVEIRA, R. P. - *Resistance to Flow and Sediment Transport in Tagus and Mondego Rivers. Appraisal of Available Prediction Methods*. Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, 1994.

COUTINHO, M. A.; ÁLVARES, M.T.; e PIMENTA, M.T. - *Erosão Hídrica e Sedimentação em Albufeiras da Bacia Hidrográfica do Rio Guadiana*. 1º Relatório Interno. Lisboa, INAG, IST, UTL, 1993.

- NEVES, G.O. - *Escoamentos Uniformes em Canais de Leito Móvel*, Dissertação de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos, Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa, 1992.
- PIMENTA, M.T. - *Avaliação da erosão hídrica em pequenas bacias na bacia hidrográfica do rio Guadiana*, Dissertação de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos, Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa, 1995.
- STRAND, R. I.; PEMBERTON, E.L. - *Reservoir Sedimentation*. Denver, Colorado, Technical Guideline for Bureau of Reclamation, 1982.
- SIMONS, D. B.; SENTÜRK, F. - *Sediment Transport Technology*. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, 1977.
- TOMÁS, P. - *Estudo da Erosão Hídrica em Solos Agrícolas - Aplicação à região Sul de Portugal*. Dissertação de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos, Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa, 1992